

Возможность регистрации 4n-кластера с помощью позиционно-чувствительной пропорциональной камеры и парного спектрометра на каскадных нейтронах линейного ускорителя

Скоркин В.М., Караевский С.Х., Потащев С.И.

ФГБУН Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

E-mail: skorkin@inr.ru

ВВЕДЕНИЕ

Теоретические модели ядерного взаимодействия допускают существование экзотических альфа-конденсатных состояний и мультинейтронных кластеров. Расчеты с учётом трехнуклонных сил предсказывают резонансное возбуждение в континууме скоррелированных четырех нейтронов с энергией ~2 МэВ или существование 4n-кластера в ядерном поле свыше 3 МэВ и радиусом ≥3 фм [1]. Многочисленные эксперименты по поиску 4n кластерного состояния привели к обнаружению резонансного состояния скоррелированных нейтронов в реакции рассеяния ядер ^8He на протоне [2].

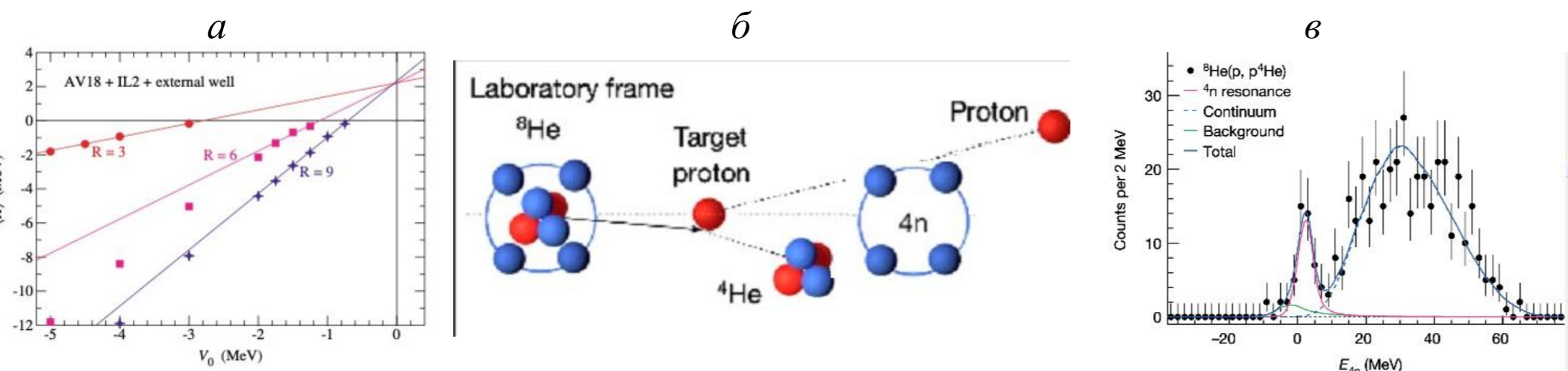


Рис. 1. а- 4 скоррелированных нейтронов в потенциале Вудса-Саксона радиусом R и глубиной V_0 экстраполированы до значения $V_0 \rightarrow 0$ вблизи резонансной энергии 2 МэВ; б- квазиупругое рассеяние ядра ^8He на протонной мишени в л.с.; в- спектры недостающей массы 4-х нейтронов из реакции $^8\text{He}(p, p^4\text{He})4n$ (слева) и 2-х нейтронов $^8\text{He}(p, p^6\text{He})2n$ (справа).

Определенная энергия 4n резонансного состояния составляет $E_r = 2.37 \pm 0.38(\text{stat.}) \pm 0.44(\text{sys.})$ MeV, а ширина $\Gamma = 1.75 \pm 0.22(\text{stat.}) \pm 0.30(\text{sys.})$ MeV. Вероятность заселения 4-х нейтронной системы в резонансном состоянии после отделения α -частицы от ядра ^8He определяется перекрытием волновой функции 4n в конечном состоянии и относительным движением 4-х нейтронов в исходном состоянии ^8He и составила $P_r = 18,7 \pm 2,3$ %, что меньше теоретической оценки по модели COSMA (≤ 30 % с гиперрадиусом 5 фм). Энергия и угловые распределения фрагментов прямого одновременного излучения коррелированных нейтронов при распаде 4n-кластерного состояния зависят от пространственных корреляций «валентных» нуклонов в ядерной структуре. В настоящей работе рассматривается возможность регистрации 4n кластера скоррелированных нейтронов в квазимолекулярной структуре 4n- $^8\text{Be}^*$, возбужденной в реакции $^{13}\text{C}(n, 2p)^{12}\text{Be}$ на каскадных нейтронах линейного ускорителя протонов (LINAC) ИЯИ РАН. Расчеты с использованием антисимметричной модели молекулярной динамики выявили кластерную структуру ядер с $A=12$ (^{12}Be , ^{12}B , ^{12}C) [3]. В аналоговых возбужденных состояниях легких ядер обнаружены α и ^8Be кластерные состояния с изоспином $T = 2$ [4]. В работе [5] исследованы α -кластерные распады возбужденных состояний ^{12}Be в реакции $^9\text{Li} + ^7\text{Li} \rightarrow ^{12}\text{Be}^*$ при энергии пучка ^9Li 74,8 МэВ. При их распаде в каналы $^4\text{He} + ^8\text{He}$, $^6\text{He} + ^6\text{He}$ и $^6\text{He} + ^6\text{He}^*(1,8 \text{ МэВ}, J^\pi = 2^+)$ наблюдаются возбужденные состояния ^{12}Be в интервале энергий от 10 до 25 МэВ и исследованы различные механизмы реакции, обеспечивающие заселение высоковозбужденных кластерных состояний ^{12}Be .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Конверсионный метод регистрации 4n- $^8\text{Be}^*$ кластерного структуры. В реакциях нуклонов средних и промежуточных энергиях на легких ядрах обнаружена повышенная фрагментации α -кластера ^8Be (до 30%) [6], что может быть использовано для идентификации возбужденного состояния 4n- $^8\text{Be}^*$. В работе [7] исследован е+е-конверсионный переход при гамма распаде высоковозбужденного состояния ядра ^8Be с энергией 17.5 МэВ в реакции $p + ^7\text{Li} \rightarrow ^8\text{Be}^*$. При энергии протона ниже 1 МэВ выделяемая энергия реакции достаточна для возбуждения $^8\text{Be}^*$ состояния с энергией 17.5 МэВ и регистрации бета частиц от конверсионного перехода парным бета спектрометром (Рис.2а). Возбуждение 17.5 МэВ состояния ^8Be и конверсионный β -переход исследованы на каскадных нейтронах LINAC ИЯИ РАН в реакции $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}^* \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He} + e^+ + e^-$ с помощью нейтронного детектора на основе позиционно-чувствительной пропорциональной камеры с ^{10}B мишенью и парного бета спектрометра на основе стриповых кремниевых и сцинтилляционных NaI детекторов [8.]. Рис.2б показана схема парного бета спектрометра и пропорциональной камеры с борным конвертером: 1- Cd фильтр, 2-пропорциональная камера, 3-сцинтилляционный NaI детектор, 4-стриповый кремниевый детектор, 5- чувствительный к нейтронам слой ^{10}B .

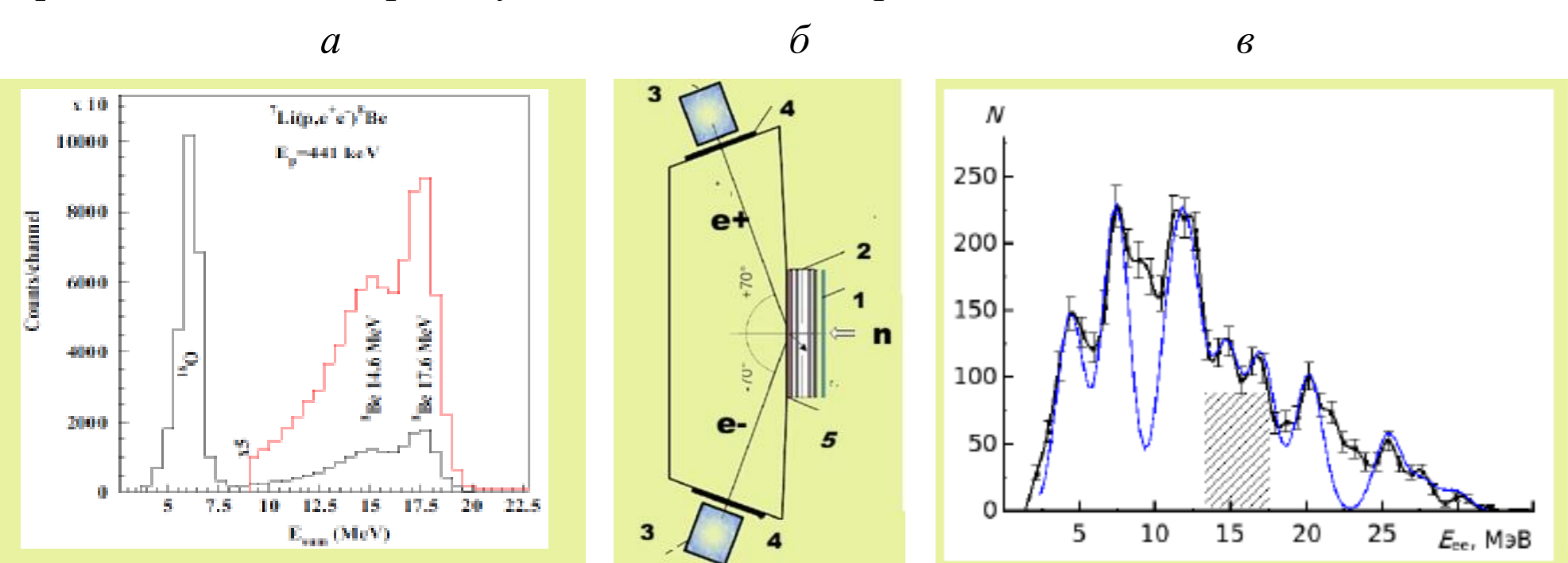


Рис. 2. а- спектр полной энергии e^+e^- частиц из реакциям $p + ^7\text{Li} \rightarrow ^8\text{Be}^*$. при энергии протонов $E_p = 0.441$ МэВ на LiF_2 мишени; б-схема бета спектрометра; в- спектр энергии e^+e^- пары из реакции $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}^*$ с вкладами переходов 14.5 и 17.5 МэВ.

С помощью этого детектора был получен спектр полной энергии пары частиц e^+e^- из реакции $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}^*$ с вкладами переходами 14.5 и 17.5 МэВ (Рис. 2в). Для возбуждения 17.5 МэВ состояния бериллия и регистрации пропорциональной камерой T и α -частиц в реакции $^{10}\text{B}(n, T) ^8\text{Be}^*$ были использованы каскадные нейтроны с энергией более 18 МэВ от W ловушки пучка протонов LINAC с энергией пучка 267 МэВ, импульсном током 5 мА, длительностью 180 мкс и частотой 50 Гц. Возбуждение кластерного состояния 4n- $^8\text{Be}^*$ в реакции перезарядки $^{13}\text{C}(n, 2p)^{12}\text{Be}^*$ с образованием 17.5 МэВ состояния $^8\text{Be}^*$ возможно при энергии каскадных нейтронов свыше 45 МэВ. Возбужденное состояние $^8\text{Be}^*$ находится в области возбужденных ротационных состояний $^{12}\text{Be}^*$ с $J^\pi=6^+$ в интервале энергий от 15 до 20 МэВ, что энергетически ($17.5 + 2.4=19.9$ МэВ) соответствует возбуждению

α -кластерной резонансной структуры 4n- $^8\text{Be}^*$ [4]. Кластерное резонансное состояние 4n- $^8\text{Be}^*$ в реакции $^{13}\text{C}(n, 2p)^{12}\text{Be}$ можно обнаружить по измерению парным спектрометром энергии e^+e^- частиц внутреннего конверсионного перехода 17.5 МэВ возбужденного состояния ядра $^8\text{Be}^*$ с отбором энергии, углов и ионизационных потерь протонов пары 2p в позиционно-чувствительной пропорциональной камере. Основное состояние ^{12}Be определяется по измерению ионизационных потерь, углов и энергии протонов 2p в пропорциональной камере с отбором событий регистрации спектрометром бета частиц от распада ядер ^{12}Be и ^{12}B : $^{12}\text{Be} \rightarrow \beta(11.5 \text{ МэВ}, 21.4 \text{ мс})^{12}\text{B} \rightarrow \beta(14 \text{ МэВ}, 20.2 \text{ мс})^{12}\text{C} + 3\alpha$ (0.2 МэВ, 1.5%).

Моделирование кинематики, ионизационных потерь и условий эксперимента.

Импульсный пучок протонов линейного ускорителя током свыше 10 мА при энергии до 300 МэВ и длительностью 200 мкс создаёт в экспериментальной зоне поток каскадных нейтронов $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При сечении реакции ≈ 1 мбар с энергией нейтронов свыше 50 МэВ скорость счета событий ^{12}Be в реакции $^{13}\text{C}(n, 2p)^{12}\text{Be}$ составит $\sim 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Предварительные расчеты кинематики реакции с образованием ^{12}Be в основном и возбужденных состояниях от 12 до 24 МэВ определили область углов и энергии для регистрации двух протонов и продуктов распада возбужденных состояний ^{12}Be (Рис.3).

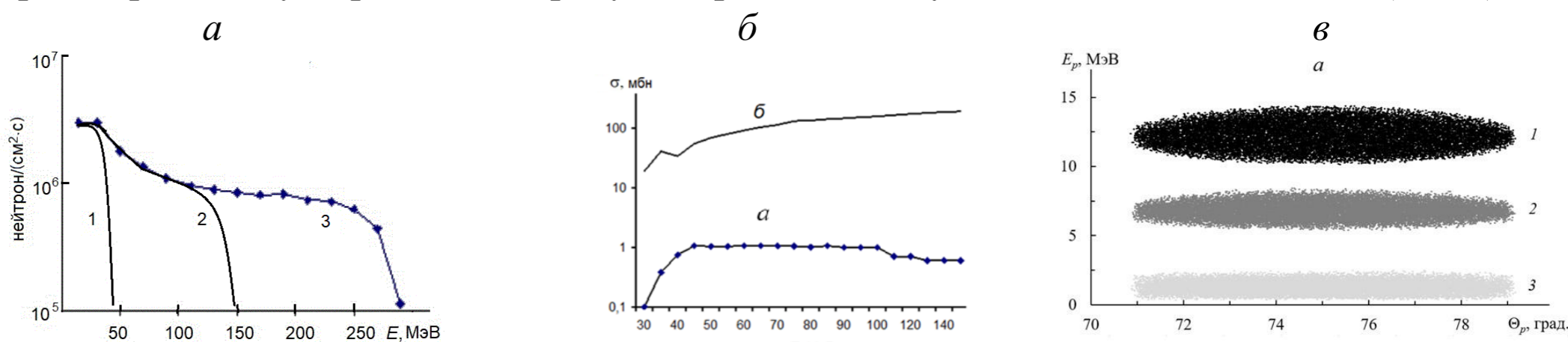


Рис. 3. а- плотность потока каскадных нейтронов в экспериментальной зоне при энергии протонного пучка ускорителя от 45 до 300 МэВ; б- сечение реакции $^{13}\text{C}(n, 2p)^{12}\text{Be}$ для основного состояния бериллия; в- диаграмма протона $E_p - \Theta_p$ в реакции $n + ^{13}\text{C} \rightarrow ^2p + ^{12}\text{Be}$ при энергии нейтронов 60 МэВ с образованием ядра ^{12}Be в основном и возбужденных 12 МэВ и 24 МэВ состояниях.

Для регистрации конверсионного перехода с полной энергией e^+e^- частиц 17.5 МэВ в реакции $^{13}\text{C}(n, 2p)^{12}\text{Be}^*$ оптимальная энергия каскадных нейтронов составляет ~ 55 МэВ. При этой энергии имеется максимум сечения $^{13}\text{C}(n, 2p)^{12}\text{Be}$ реакции и максимальный экспериментальный выход каскадных нейтронов с энергией >40 МэВ. При этом протоны имеют энергию около 5 МэВ, что оптимально для регистрации и отборы событий по ионизационным потерям в пропорциональной камере.(Рис. 4).

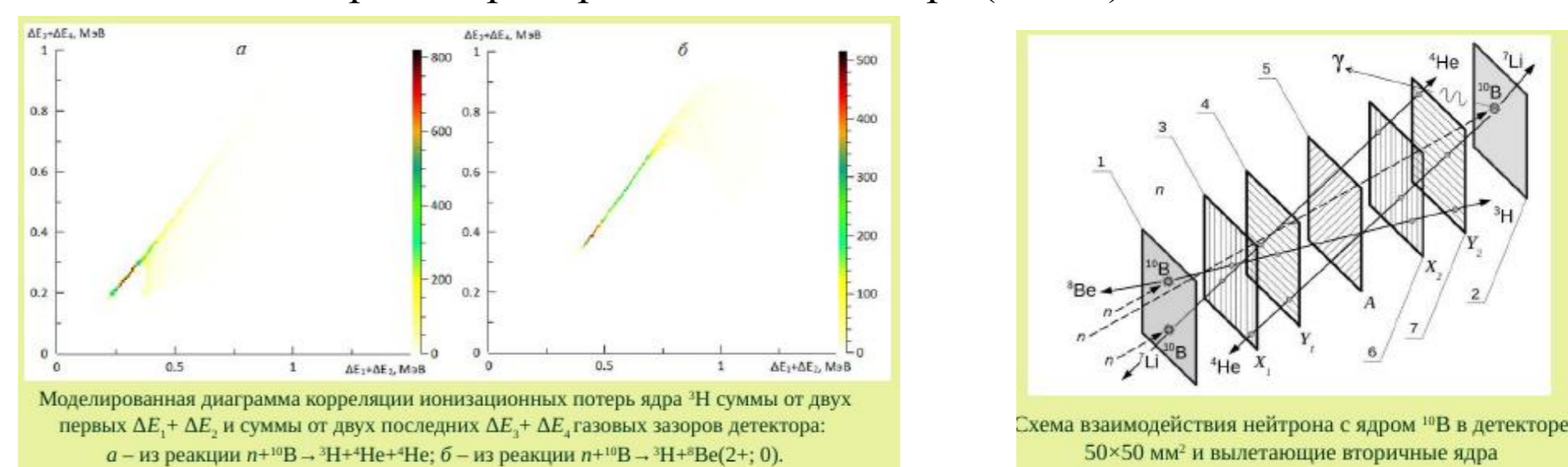


Рис. 4. Моделирование ионизационных потерь вторичного ядра ^3H в ПЧДН. а- для основного состояния ^8Be ; б- для возбужденного состояния $2+ ^8\text{Be}$.

Тестирование установки на импульсном источнике каскадных нейтронов (Рис. 5а). Установка состоит из позиционно-чувствительной пропорциональной камеры площадью $5 \times 5 \text{ см}^2$ (Рис. 5б), 32 каналного парного бета спектрометра площадью $6.4 \times 6.4 \text{ см}^2$ и электронной системы считывания (Рис. 5в) из 8- канального усилителя, конвертеров и 4-в-1 сумматоров дифференциальных сигналов, 32-канального 64МСлота сигнального процессора и триггера мастера сцинтилляционных детекторов.

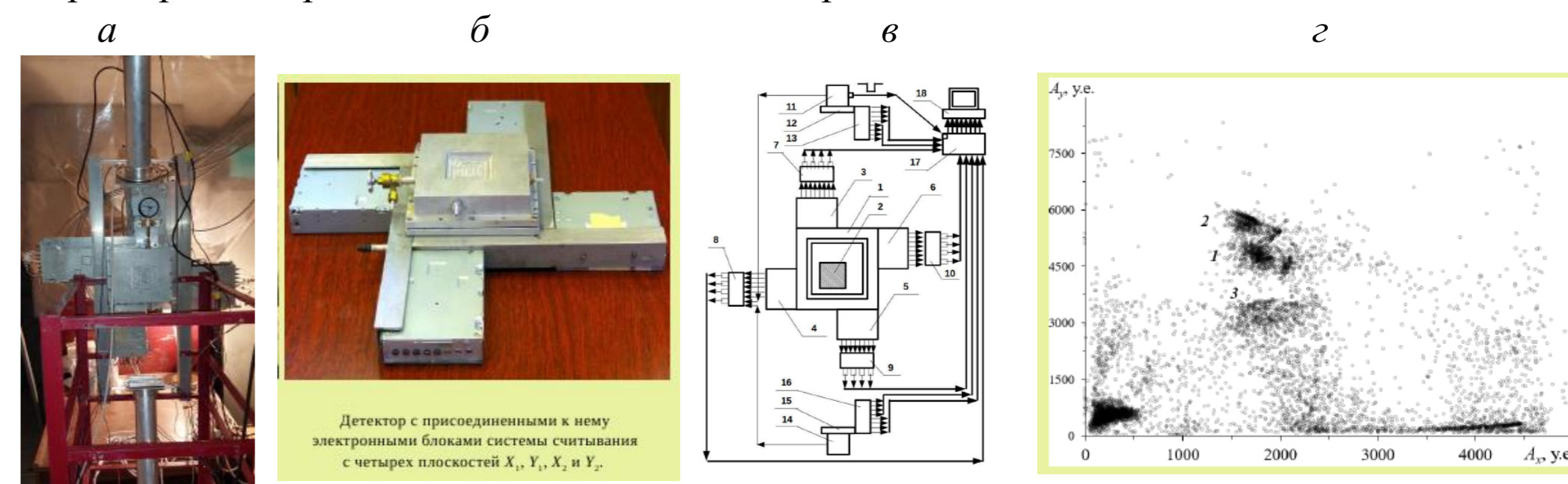


Рис.5. Тестирование установки на канале каскадных нейтронов LINAC в реакциях $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li} + \gamma$ (1); $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li}$ (2); $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}$ (3); з- экспериментальные корреляции амплитуд сигналов от ионизационных потерь частиц из реакций 1, 2, и 3 в двух последовательных промежутках пропорциональной камеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pieper S.C. // Argonne, Illinois 60439, USA. 2018, arxiv: nucl-th/0302048v2.
2. Duer M., Aumann T., Gernhäuser R. L., et al/ Observation of a correlated free four-neutron system. Nature, 2022, 606 (7915), pp.678-682. https://hal.science/hal-03705487v1.
3. Kanada-En'yo Y. and Ogata K. // Physical Review C **100**, 064616-13 (2019)
4. Kelley J.H., Purcell J.E., Sheu C.G. // Nucl. Phys. A. 2017. V. 968. P. 71.
5. Vukman N., Soić N., Freer M. et al// Front. Phys., Nuclear Physics Volume 10 - 2022]
6. Лепехин Ф. Г., Симонов Б. Б. ЯФ, 2005, том 68, № 12, с. 1–8.
7. Gulyas, T.J. Ketel, A.J. Krasznahorkay et al// Nucl. Instr. and Meth. A. 2016. V. 808. P. 21. https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.009.
8. Потащев С.И., Бурмистров Ю.М., Драчев А.И., Каспаров А.А. /«Позиционно-чувствительный детектор медленных и быстрых нейтронов. Патент РФ на изобретение Патент RU 2788834 C1 от 26.04.2022, опубликован 24.01.2023]
9. Потащев С. И. // ЯФ. 2023. Т.86. № 5. С. 634; Potashev S.I. // Phys. Atom. Nucl. 2023. V. 86. No 5. P. 850.